سنة أولى ميكانيك عام

ف ٢ ف

د. رستناوي

م٢

# الفصل 23 الحقول الكهربائية

مخطط تمهيدي للفصل


23.1. خواص الشحن الكهربائية

23.2. شحن الأجسام بالتحريض

23.3. قانون كولون

23.4. الحقل الكهربائي

23.5. الحقل الكهربائي لتوزع مستمر للشحنة

23.6. خطوط الحقل الكهربائي

23.7. حركة الجسيمات المشحونة في حقل كهربائي منتظم

إن القوة الكهرومغناطيسية بين الجسيمات المشحونة هي إحدى القوى الأساسية الموجودة في الطبيعة. لهذا نحن سنبدأ هذا الفصل بتوصيف بعض الخواص الأساسية لإحدى تجليات القوة الكهرومغناطيسية؛ أي القوة الكهربائية، ثم سنناقش قانون كولون الذي هو القانون الأساس الحاكم للقوة الكهربائية بين أي جسيمين مشحونين. ثم سنقدم مفهوم الحقل الكهربائي المرافق لتوزع شحني معطى. ثم نختم هذا الفصل بمناقشة حركة جسيم مشحون في حقل كهربائي منتظم.

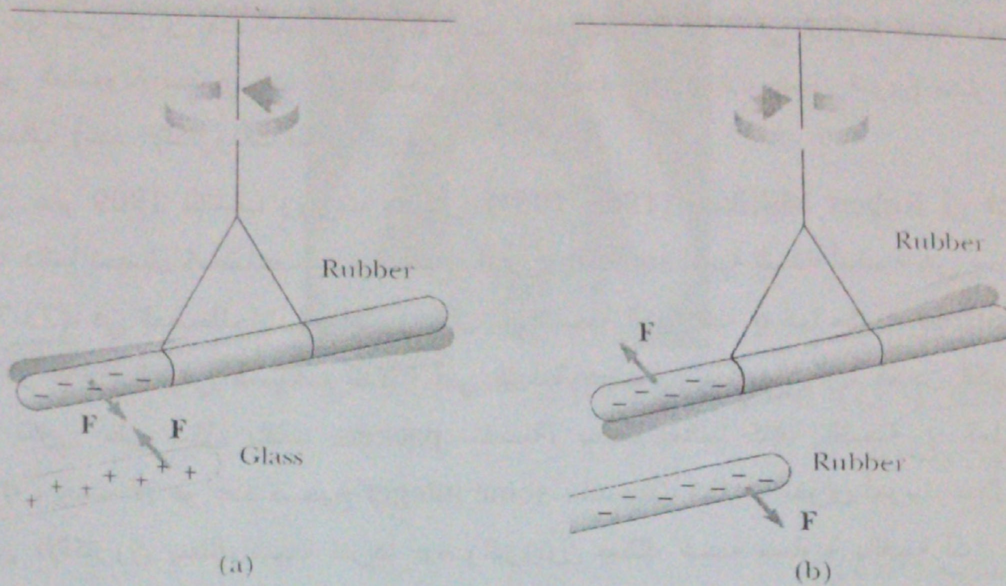
## 23.1. خواص الشحن الكهربائية

هنالك العديد من التجارب البسيطة التي يمكنها توضيح حقيقة وجود القوى والشحنات الكهربائية. على سبيل المثال، في يوم جاف، بعد أن تُمرر مشطاً خلال شعرك، ستجد أن المشط أصبح قادراً على جذب قصاصاتٍ من الورق. وغالباً ما تكون قوة الجذب هذه شديدة بما يكفي لكي تَعلَق القصاصات بالمشط. المفعول ذاته يمكن أن يحدث أيضاً عندما تَدلك (تفرك) مواداً معينةً أخرى ببعضها البعض، مثلاً، لدى دلكك الزجاج بالحرير أو المطاط بالفراء.

تجربة أخرى بسيطة هي أن يُدلك بالون منتفخ بالصوف، وعندما يلصق إلى جدار، فإنه يبقى ملتصقاً على الأغلب لساعات. عندما تتصرف المواد بهذه الطريقة، يُقال عنها أنها مكهربة *electrified*، أو أنها أصبحت مشحونة كهربائياً، أنت كذلك يمكنك بسهولة أن تُكهرب جسمك وذلك بأن تدلك حذاؤك بشدة على بساط من الصوف. إن الدليل على وجود شحن كهربائية على جسمك يمكن تكتشفه عندما تلمس بلطف (وبسرعة) صديق، وعندما تتوفر ظروف مناسبة، فإنك سترى انطلاق شرارة لدى لمسك إياه، وكلاكما سيشعر بلذعة خفيفة. إن تجارباً كهذه يمكن تُجري بشكل أفضل في نهار جاف، لأن وجود رطوبة زائدة في الهواء يمكن أن يتسبب بتسرب الشحنة من جسمك إلى الأرض.

في سلسلة من التجارب البسيطة، يمكنك التوصل إلى أن هنالك نوعان من الشحن الكهربائية، التي كان بنيامين فرنكلين (1706–1790) Benjamin Franklin قد أعطاهما نعت موجبة وسالبة. نحن نعرّف الشحنة السالبة بأنها وجود مفرط للإلكترونات بالنسبة للبروتونات، والشحنة الموجبة بأنها وجود مفرط للبروتونات بالنسبة للإلكترونات. للتحقق من وجود نوعين من الشحنات، افرض أن قضيباً من المطاط القاسي كان قد جرى دلكه بالفراء (الصوف)، ثم عُلق بخيط رفيع، كما هو مبين في الشكل (32.1)، فعندما يدلك قضيب من الزجاج بالحرير ويُقرب من القضيب المطاطي، فإنهما يتجاذبان، الشكل (23.1)(a). من ناحية أخرى، إذا قرِّب قضيبان مطاطيان مشحونان، أو قضيبان زجاجيان مشحونان، بنفس الطريقة، من بعضهما بعضاً، كما هو مبين في الشكل (23.1)، فإنهما يتنافران. تدل هذه المشاهدات بأنّ المطاط والزجاج يمتلكان نوعان مختلفان من الشحن. بناء على هذه المشاهدات، نستنتجُ بأن الشحنتين المتماثلتين (أي اللتين لها نفس الإشارة) تتنافران، وأن الشحنتين المختلفتين (أي اللتين لها إشارتين متعاكستين) تتجاذبان. وفقاً للاصطلاح المقترح من قبل فرانكلين، فإن الشحنة الكهربائية التي تكون على قضيب الزجاج هي موجبة، والتي تكون على قضيب المطاط

هي سالبة. لذلك، فإن أيّ جسم مشحون ينجذب إلى قضيب مطاطي مشحون، أو يتنافر مع قضيب زجاجي مشحون، يجب أن يكون ذا شحنة موجبة. وإن أيّ جسم مشحون يتنافر مع قضيب مطاطي مشحون، أو ينجذب إلى قضيب زجاجي مشحون، يجب أن يكون ذا شحنة سالبة.




الشكل (23.1): (a) قضيب مطاط مشحون سلباً معلق بواسطة خيط ينجذب إلى قضيب زجاجي مشحون إيجاباً. (b) قضيب مطاط مشحون سلباً يتنافر مع قضيب مطاطي آخر مشحون سلباً.

إن القوى الكهربائية الجاذبة هي المسؤولة عن سلوكِ أنواع كثيرة من المنتجات التجارية. على سبيل المثال، إن البلاستيك في العديد من العدسات اللاصقة، إتافيلكون *etafilcon*، مصنوع من جزيئات تنجذب كهربائياً إلى جزيئات البروتين الموجودة في الدموع البشرية. تتشرب جزيئاتِ البروتين هذه من البلاستيك فتتمسك به، حيث تصبح حواف العدسات كائن أساسي للدموع الملبسة للعين. بسبب ذلك، لا تتصرّف العدسة كجسم غريب عن العين لدى إلصاقها. يستفاد في العديد من مستحضرات التجميل أيضاً من القوى الكهربائية وذلك بإضافة مواد للمستحضر تنجذب كهربائياً إلى الجلد أو الشعر، وهذا ما يجعل الصبغات كالحناء والمواد الكيميائية الأخرى تتثبت بهما بمجرد تطبيقها.

إن السمة المهمة الأخرى للكهرباء، التي تلاحظ في المشاهدات التجريبية، هي أن الشحنة الكهربائية تكون محفوظة دائماً في جملة معزولة. هذا يعني أنه، عندما يفرك (يدلك) جسم ما بجسم آخر، فإن الشحنة لا تخلق في هذه العملية من العدم. فحالة التكهرب سببها انتقال الشحنة من أحد الأجسام إلى الآخر. حيث إن أحد الجسمان يكتسب قدراً معيناً من الشحنات السالبة من الآخر، وبخسارة الجسم الثاني للشحنة السالبة يصبح له نفس القدر من الشحنات الموجبة. على سبيل المثال، عندما يدلك قضيب زجاجي بالحرير، كما هو مبين في الشكل (23.2)، فإن الحرير يكتسب شحنة سالبة تكون مساويةً تماماً للشحنة الموجبة التي صارت على القضيب الزجاجي نتيجة خسارته للشحنة

السالبة. نحن، حالياً من فهمنا للتركيب الذري لكافة المواد، نعلم أن كمية من الإلكترونات تنتقل من الزجاج إلى الحرير في أثناء عملية الدلك. وبنفس الطريقة تماماً، عند دلك المطاط بالفراء، تنتقل كمية من الإلكترونات من الفراء إلى المطاط، مما يُكسب المطاط شحنة سالبة صرفة، ويجعل الفراء ذي شحنة موجبة صرفة. إن هذه العملية تتفق تماماً مع حقيقة حيادية المواد في الطبيعة أصلاً؛ أي أن المادة غير المشحونة تحتوي عدداً من الشحن الموجبة (عدد البروتونات ضمن النوى) مساوٍ لعدد الشحن السالبة (عدد الإلكترونات ضمن الذرة).

في عام 1909 اكتشف روبرت ميليكان (1868–1953) Robert Millikan أن الشحنة الكهربائية دائماً تحصل كمضاعف لعدد صحيح some integral لكمية شحنة أساسية هي $e$، انظر الشكل (23.7)، في المصطلحات المعاصرة، يقال عن الشحنة الكهربائية $q$ أنها مكممة quantized، حيث $q$ هو الرمز العرفي المستخدم للدلالة على الشحنة كمتحول. هذا يعني أن، الشحن الكهربائية الحاصلة تكون على شكل باقات packets منفصلة، بحيث يمكننا كتابة الشحنة $q$ كما يلي: $q = Ne$ ، حيث $N$ هو عدد صحيح some integer. لقد بينت تجارب أخرى أجريت خلال نفس الفترة بأن الإلكترون يمتلك شحنة قدرها $-e$ والبروتون يمتلك شحنة مساوية بالقيمة لكن بإشارة معاكسة $+e$. وأن بعض الجسيمات، مثل النيوترون، لا تمتلك شحنة.

من مناقشتنا حتى هذا الحد، نستنتج بأن الشحنة الكهربائيةِ تمتلك الخواص الهامة التالية

خواص الشحن الكهربائية

هنالك نوعين من الشحن في الطبيعة؛ شحن متعاكسة الإشارة يجذب بعضها بعضاً، وشحن متماثلة بالإشارة ينفر بعضها بعضاً.

الشحنة الكلية في منظومة معزولة تكون محفوظة.

الشحنة هي مقدار مكمم.

الشحنة الكهربائية محفوظة.



الشكل (23.2): عندما يُدلك قضيب زجاجي بالحرير، تنتقل الإلكترونات من الزجاج إلى السلك. وبسبب محفوظية الشحنة، فإنه كلما انتقلت شحنة سالبة (إلكترون) إلى الحرير، خلفت وراءها

شحنة موجبة مساوية على الزجاج. أيضاً، بما أن الشحن تنتقل في رزم (مجموعات) منفصلة، فإن الشحنة التي يكتسبها الجسيمين تكون إما $\mp e$ أو $\mp 2e$ أو $\mp 3e$،....، وهكذا.



الشكل (23.3): (اختبار سريع 23.1) إن دلك بالون بشعرك في نهار جاف يسبب انشحان كل من البالون وشعرك.

اختبار سريع (23.1)

إذا دلكت بالوناً منفوخاً بشعرك، فإن كلا المادتين (أي البالون والشعر) تنجذبان إلى بعضهما البعض، كما هو مبين في الشكل (23.3)، فهل كمية الشحنة الموجودة في منظومة البالون وشعرك بعد الدلك

(أ) أقل من كمية الشحنة الموجودة قبل الدلك،

(ب) أم نفسها،

(ج) أم أكبر.

اختبار سريع (23.1)

ثلاثة أجسام تقرّب من بعضها بعضاً، اثنان في كل مرة. عندما يقرب الجسمان A و B من بعضهما، فإنهما يتنافران. وعندما يقرب الجسمان B و C من بعضهما فإنهما أيضاً يتنافران. أيا مما يلي يكون صحيحاً:

(أ) الجسمان A و C يمتلكان شحنتان لهما نفس الإشارة،

(ب) الجسمان A و C يمتلكان شحنتان متعاكستين بالإشارة،

(ج) الأجسام الثلاثة تمتلك شحن لها نفس الإشارة،

(د) أحد هذه الأجسام محايد،

(هـ) سنحتاج لإجراء تجارب إضافية لتعيين الإشارات للشحن.

23.2. شحن الأجسام بالتحريض

الموصلات (النواقل) الكهربائية هي المواد التي بعض الإلكترونات فيها تكون إلكترونات حرة[1] أي غير مقيدة بالذرات ويمكنها أن تتحرك نسبيا بحرية خلال المادة؛ والعوازل الكهربائية هي المواد التي تكون فيها كل الإلكترونات مقيدة بالذرات ولا يمكنها أن تتحرك بحرية خلال المادة.

من المناسب تصنيف المواد من ناحية قدرة الإلكترون على التحرك خلالها:

إن المواد مثل الزجاج، والمطاط، والخشب تقع ضمن فئة العوازل الكهربائية. فعندما يجري شحن مثل هذه المواد بالدلك، فإن المنطقة المدلوكة فقط هي التي تصير مشحونة، والجزيئات المشحونة تكون غير قادرة على الانتقال إلى مناطق أخرى من المادة (العوازل تشحن موضعياً بالدلك).

على النقيض من ذلك، إن المواد مثل النحاس، والألمنيوم، والفضة، هي نواقل كهربائية جيدة. فعندما يجري شحن مثل هذه المواد بدلك منطقة صغيرة محددة منها، فإن الشحنة المتشكلة في تلك المنطقة تتوزع بسهولة على كامل سطح المادة. إذا أمسكت قضيباً نحاسياً في يدك ودلكته بالصوف أو الفراء، وقربته من قصاصات الورق الصغيرة، فإنه لن يجذبها. إن هذا يوحي بأن المعادن لا يمكن أن تشحن بالدلك. لكن، إذا ما ثبتَّ مقبضاً خشبياً إلى القضيب النحاسي ثم أمسكت به من المقبض عندما تقوم بعملية دلكه، فإن القضيب سيبقى مشحوناً، ويجذب قصاصات الورق عندما تقربه منها. إنّ التفسيرَ لهذا هو كما يلي: بدون المقبض الخشبي العازل، إن الشحنة الكهربائية الناتجة بالدلك تتحركُ بسهولة من النحاسِ عبر جسمكِ، الذي هو أيضاً ناقل، إلى الأرضِ. وبوجود المقبض الخشبي العازل، فإنه يمنع جريان الشحنة الكهربائية عبر يدك إلى جسمك فالأرض.

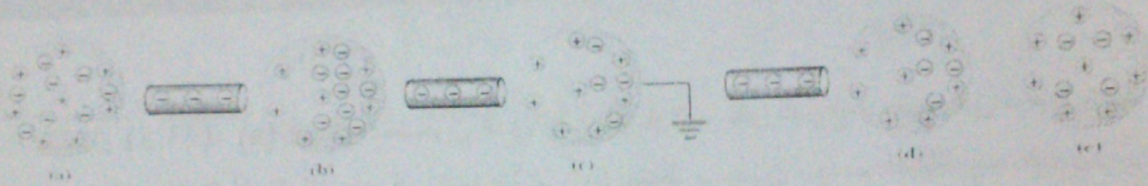
إن أشباه الموصلات (أنصاف النواقل) هي الفئة الثالثة من المواد، فالخواص الكهربائية لها فيما بين العوازل والموصلات (النواقل). إن السيليكون والجرمانيوم هما مثالان مشهوران جداً عن أشباه الموصلات يستعملان كثيراً في صناعة العديد الرقائق الإلكترونيةِ التي تستعمل في الحواسيب، والهواتف الخلوية، وأنظمة ستيريو. الخواص الكهربائية لأشباهِ الموصلات يمكن تغيرها على مدى عدة مراتب من حيث القيمة بإضافةِ كميات مضبوطة من ذرات معينة لهذه المواد.

لفهم كيف يتم شحن ناقل بطريقة التحريض (الحثّ)، نأخذ كرة ناقلة محايدة (غير مشحونة) معزولة عن الأرض، كما هو مبين في الشكل (23.4)(a). إذا كانت الشحنة التي على الكرة هي بالضبط صفراً، فإن عدد الإلكترونات في الكرة يكون مساو لعدد البروتونات. عندما يُقرّب من الكرة (دون ملامسة) قضيب مطاطي مشحون بشحنة سالبة، فإن الإلكترونات في الكرة في المنطقة الأقرب

---

[1] إن أي ذرة معدنية تحتوي على إلكترون خارجي واحد أو أكثر، أو هذه الإلكترونات تكون مقيدة بشكل ضعيف بالنواة. عندما يتجمع العديد من الذرات لتشكل المعدن، يظهر ما يسمى بالإلكترونات الحرة *free electrons*، هي بالتحديد الإلكترونات الخارجية، التي لا تكون مقيدة بأي ذرة محددة، فهي تتنقل ضمن المعدن من ذرة إلى أخرى بأسلوب مشابه لحركة جزيئات الغاز الموجودة في حاوية.

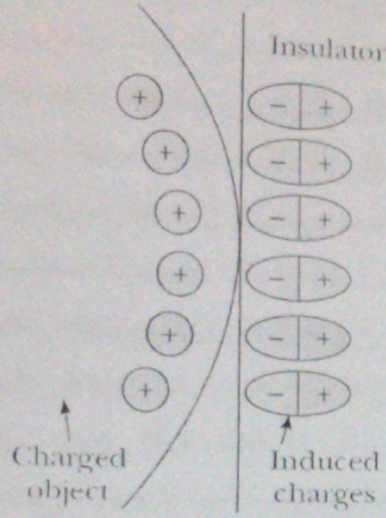
إلى القضيب تصير خاضعة لقوة تنافر، فتهاجر إلى الطرف المعاكس من الكرة. إن هذا يترك الطرف القريب من القضيب بشحنة حقيقية موجبة بسبب قلة عدد الإلكترونات فيه، كما هو مبين في الشكل (23.4)(b) (إن الجانب الأيسر من الكرة في الشكل (23.4)(b) ينشحن إيجاباً كما لو أن شحنة موجبة تحركت إلى هذه المنطقة، لكن تذكّر بأنّ الإلكترونات هي فقط التي يمكنها أن تتحرك بحرية). عملياً إن هذا يحدث حتى لو أن القضيب لم يلمس مطلقاً الكرة. إذا ما أجريت نفس التجربة لكن بوصل سلك ناقل من الكرة إلى الأرض، الشكل (23.4)(c)، فإن بعض الإلكترونات في الكرة الناقلة تتنافر بشدة بوجود الشحن السالبة في القضيب فتتحرك من الكرة عبر السلك إلى الأرض. إنّ الرمز ⏚ في نهاية السلك في الشكل (23.4)(c) يُشير إلى أنّ السلك موصول إلى الأرض، الذي يعني أن خزاناً، مثل الأرض، يمكنه أن يتلقى بحرية الإلكترونات أو يزود بها بتأثير مهمل على خصائصه الكهربائية. ثم إذا ما أزيل السلك الموصول إلى الأرض، الشكل (23.4)(d)، فإن الكرة الناقلة ستحتوي على شحنة موجبة محرضة (مستحثة) لأنه بقي فيها كمية من الإلكترونات أقل مما تحتاج للتعادل مع شحنة البروتونات الموجبة. عندما يُبعد قضيب المطاط عن المنطقة المجاورة للكرة، الشكل (23.4)(e)، فإن الشحنة الموجبة المحرضة هذه تبقى على الكرة غير المؤرضة. لاحظ أنه، في أثناء هذه العملية، لم يفقد قضيب المطاط شيئاً من شحنته السالبة.



الشكل (23.4): إن شحن جسمٍ معدني بالتحريض *induction* (يعني أن الجسمان لا يلمس أحدهما الآخر مطلقاً). (a) كرة معدنية محايدة، فيها عدد متساوٍ من الشحن الموجبة والسالبة. (b) إعادة توزيع الإلكترونات في الكرة المحايدة عند تقريب قضيب مطاطي مشحون إلى منطقة مجاورة للكرة. (c) عند تأريض الكرة، فإن بعض إلكتروناتها تغادرها عبر سلك التأريض. (d) عند استبعاد وصلة التأريض، فإن الكرة تمتلك شحنة موجبة فائضة (بالنسبة للشحن السالبة) يكون توزعها غير منتظم. (e) عند إبعاد قضيب المطاط، يُعاد توزع الإلكترونات المتبقية بشكل منتظم، ويكون هنالك أيضاً توزعاً منتظماً صرفاً للشحنات الموجبة على الكرة.

إن شحن أي جسمٍ بالتحريض لا يتطلب عمل تماسه مع الجسم المُحرض للشحنة. إن هذا يكون خلافاً لشحن الجسم بالدلك؛ أي بالتوصيل *conduction*، الذي يتطلب تماساً فيما بين الجسمين. إن عمليةً مشابهة للتحريض في النواقل تحدث في العوازل. في معظم الجزيئات المحايدة، مركز الشحن الموجبة يتطابق مع مركز الشحن السالبة. لكن، بتقريب جسم مشحون، هذين المركزين داخل كُلّ جزيئةٍ في العازل يمكن أن ينزاحا قليلاً عن بعضهما البعض، مما يجعل شحنة أكثر إيجابية على أحد طرفي الجزيئة من الطرف الآخر. إن إعادة الاصطفاف هذه للشحنة ضمن جزيئاتٍ تنتج طبقة شحنة

على سطح العازل، كما هو مبين في الشكل (23.5)(a)، بمعرفتك هذه عن كيفية التحريض في العوازل، ستكون قادراً على تفسير لماذا يكون المشط الذي تدلكه بشعرك قادراً على جذب قصاصات الورق المحايدة كهربائياً، ولماذا يكون البالون الذي تدلكه بلباسك قادراً على التمسك بجدار محايد كهربائياً.







(a) (b)

الشكل (23.5): (a) الجسم المشحون الذي على اليسار يحرض توزع شحني على سطح عازل بسببه اصطفاف (استقطاب) للشحن في الجزيئات. (b) مشط مشحون يجذب قصاصات الورق لأن الشحن في جزيئات الورق قد (استقطبت).

اختبار سريع (23.3)

ثلاثة أجسام تُقرّب إلى بعضها البعض، اثنان في كل مرة. عندما يقرب الجسمان A و B من بعضهما، فإنهما يتجاذبان. وعندما يقرب الجسمان B و C من بعضهما، فإنهما يتدافعان. نستنتج من ذلك أن:

(أ) الجسمان A و C يمتلكان شحنتان لهما نفس الإشارة.

(ب) الجسمان A و C يمتلكان شحنتان متعاكستان بالإشارة.

(ج) الأجسام الثلاثة تمتلك شحن لها نفس الإشارة.

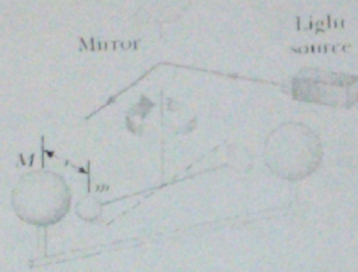
(د) أحد هذه الأجسام محايد.

(هـ) نحتاج لتجارب إضافية للحصول على معلومات عن نوع الشحن على الأجسام.

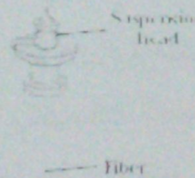
## 23.3. قانون كولون

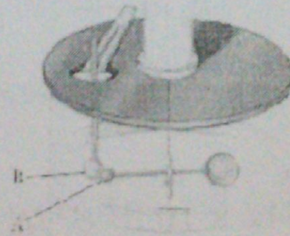
لقد قاس تشارلز كولون (1736-1806) قيمة القوى الكهربائية بين الأجسام المشحونة باستخدام ميزان الفتل، الشكل (23.6)، الذي اخترعه هو. لقد أثبت كولون بواسطته أنّ قيمة القوة الكهربائية $F_e$ بين كرتين صغيرتين مشحونتين تتناسب مع مقلوب مربع البعد $r$ بينهما؛ أي مع

$F_e \propto 1/r^2$ (قانون التربيع العكسي). إنّ مبدأ عمل ميزان الفتل مشابه تماماً للجهاز الذي استعمله كافيندش Cavendish من أجل قياس ثابت التجاذب الكتلي، انظر الشكل (13.4)، إذا ما جرى استبدال الكرات المحايدة بأخرى مشحونة كهربائياً. إن القوة الكهربائية بين الكرتين المشحونتين A و B، في الشكل (23.6)، تسبب إما تجاذب هاتين الكرتين إلى بعضهما أو تنافرهما، مما يتسبب بدوران الكرتين، مولدة في سلك التعليق (سلك من ليف زجاجي) مزدوجة فتل مرونية تعيد الكرات إلى وضعها الابتدائي بزوال القوة المؤثرة. وبما أن عزم مزدوجة الفتل الذي يعيد السلك المنفتل إلى وضعه الابتدائي يتناسب مع الزاوية التي دارها السلك، فإن تعيين هذه الزاوية يقدم قياساً كمياً عن شدة قوة التجاذب (أو قوة التنافر الكهربائي) الناشئة بين الكرتين المشحونتين. فبمجرد أن تُشحن الكرتين بالدلك، تتولد بين الكرتين قوة كهربائية تكون أكبر بكثير من قوة التجاذب الكتلي بينهما، لذلك يمكننا إهمال تأثير قوة التجاذب الكتلي هذه.




الشكل (13.4): جهاز كافيندش من أجل قياس ثابت التجاذب الكتلي. إن الخطوط المشحطة تمثل الوضع الابتدائي للقضيب.




الشكل (23.6): ميزان الفتل لكولون، يستخدم لإثبات قانون مقلوب-المربع (أو قانون التربيع العكسي) من أجل القوى الكهربائية بين شحنتين.

من تجربة كولون، الشكل (6)، يمكننا تعميم الخصائص أدناه للقوة الكهربائية بين جسيمتين مشحونتين ساكنتين.

إن القوة الكهربائية $F_e$

- تتناسب عكساً مع مربع المسافة الفاصلة $r$ بين الجسيمتين،
- ومنحاها يكون على امتداد المستقيم للخط الواصل بينهما،
- تتناسب طرداً مع جداء شحنتي الجسيمتين $q_1$ و $q_2$،
- وتكون تجاذبية إذا كانت الشحنتين بإشارة متعاكسة،
- وتكون تنافرية إذا كان للشحنتين لهما نفس الإشارة،
- وهي قوة محافظة.

نحن نستخدم مصطلح الشحنة النقطية التي هي جسيم أبعاده معدومة يحمل نفس الشحنة الكهربائية للجسم المدروس. إنّ السلوك الكهربائي للإلكترونات والبروتونات يمكن توصيفه بشكل جيد بنمذجتهما كشحنتين نقطيتين. من المشاهدات التجريبية على القوة الكهربائية، يمكننا التعبير عن قانون كولون بمعادلة تعطي قيمة القوة الكهربائية بين شحنتين نقطيتين (هذه المعادلة تدعى أحياناً **قانون كولون**).

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \qquad (23.1)$$

قانون كولون

حيث $k_e$ هو ثابت يدعى ثابت كولون. في هذه التجربة استطاع كولون أن يبين بأن قيمة الأس لـ $r$ هي 2 بشك قدره بضعة أجزاء من المائة. والقياسات الحديثة بينت أن الأس هو 2 بشك قدره عدة أجزاء في $10^{16}$. إن قيمة ثابت كولون تعتمد على الوحدة المختارة. فوحدة الشحنة في الجملة الدولية هي الكولون ($C$). إن ثابت كولون في الجملة الدولية يكون له القيمة:

$$k_e = 8.9875 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2 \qquad (23.2)$$

ثابت كولون

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \qquad (23.3)$$

حيث الثابت $\epsilon_0$ (الحرف الإغريقي الصغير إبسيلون) معروف بسماحية الخلاء الحر، وله القيمة:

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2 \qquad (23.4)$$

$$e = 1.60219 \times 10^{-19}\ C \qquad (23.5)$$

إن وحدة الشحنة الأصغر $e$ المعروفة في الطبيعة[2] هي شحنة الإلكترون $(-e)$ أو شحنة البروتون $(+e)$ وتمتلك القيمة:

$$e = 1.60219 \times 10^{-19}\ C \qquad (23.5)$$

لذلك، إن شحنة قدرها $1\ C$ تساوي تقريباً شحنة $6.24 \times 10^{18}$ إلكترون أو بروتون. إن هذا العدد يكون صغيرٌ جداً عندما يقارن مع عددِ الإلكترونات الحرة في $1cm^3$ من النحاس، الذي هو من رتبة $10^{23}$. ما زال، $1\ C$ كميةَ كبيرةَ من الشحنة. في التجارب النموذجية التي يشحن فيها قضيب مطاطي أو زجاجي بالاحتكاك، يُحصل على شحنة صافية من رتبة $10^{-6}C$. بكلام آخر، إن حصة صغير جداً فقط من الشحنة الكلية المتاحة تنتقل بين القضيب والمادة المدلوكة.

إن الشحنة والكتلة للإلكترون والبروتون والنيوترون معطاة في الجدول (23.1)

**Charge and Mass of the Electron, Proton, and Neutron**

| Particle | Charge (C) | Mass (kg) |
|---|---|---|
| Electron (e) | $-1.602\,191\,7 \times 10^{-19}$ | $9.109\,5 \times 10^{-31}$ |
| Proton (p) | $+1.602\,191\,7 \times 10^{-19}$ | $1.672\,61 \times 10^{-27}$ |
| Neutron (n) | 0 | $1.674\,92 \times 10^{-27}$ |

الجدول (23.1): شحنة وكتلة الإلكترون والبروتون والنيوترون.

اختبار سريع (23.4):

جسم $A$ يمتلك شحنة قدرها $+2\mu C$، وجسم آخر $B$ يمتلك شحنة قدرها $+6\mu C$، أي من العبارات التالية، فيما يتعلق بقيمة القوة الكهربائية بينهما، تكون صحيحة؟.

(أ) $F_{AB} = -3F_{BA}$.

(ب) $F_{AB} = -F_{BA}$.

(ج) $3F_{AB} = -F_{BA}$.

(د) $F_{AB} = 3F_{BA}$.

(هـ) $F_{AB} = F_{BA}$.

(و) $3F_{AB} = -F_{BA}$.

---

[2] لا وجود لوحدة شحنة مكتشفة على جسيمة حرة (مستقلة) أصغر من $e$؛ لكن، حالياً هنالك نظريات تفترض وجود جسيمات تدعى كواركات quarks تمتلك شحنات $-e/3$ و $2e/3$. بالرغم من أن هناك دليل تجريبي كبير عن هذا الجسيمات ضمن المادة النووية، الكوركات quarks الحرة لم يتم الكشف عنها مطلقاً. إن الخواص الأخرى للكوركات سنناقشها في **الفصل 46** في النسخة الموسعة لهذا النص.

**مثال (23.1) ذرة الهيدروجين**

إذا علمت أن الإلكترون يبعد عن البروتون في ذرة الهيدروجين مسافة قدرها $5.3 \times 10^{-11} m$ تقريباً (بالمتوسط)، فأوجد القيمة المطلقة للقوة الكهربائية بين هاتين الجسيمتين، ثم أوجد قيمة قوة التجاذب الكتلي بينهما، ماذا تستنتج؟.

**الحل:** من قانون كولون نجد أن القيمة المطلقة للقوة الكهربائية هي:

$$F_e = k_e \frac{|e||-e|}{r^2}$$

$$F_e = \left(8.9875 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right) \frac{(1.60219 \times 10^{-19}\, C)^2}{(5.3 \times 10^{-11} m)^2} = 8.2 \times 10^{-8} N$$

ومن قانون نيوتن في التجاذب الكتلي وباستخدام كتل الجسيمات من الجدول (23.1)، نجد أن قيمة قوة التجاذب الكتلي:

$$F_g = G \frac{m_e \cdot m_p}{r^2}$$

$$F_g = \left(6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}\right) \frac{(9.11 \times 10^{-31}\, kg)(1.67 \times 10^{-27}\, kg)}{(5.3 \times 10^{-11} m)^2}$$
$$= 3.6 \times 10^{-47} N$$

نلاحظ أن النسبة بين القوتين هي $F_e/F_g = 2 \times 10^{39}$، وهذا يعني أن قوة التجاذب الكتلي بين الجسيمات الذرية المشحونة مهملة بالمقارنة مع القوة الكهربائية بينها. ونلاحظ أن هنالك تشابه في الشكل بين قانون نيوتن في التجاذب الكتلي وقانون كولون في التجاذب والتنافر الكهربائي. عدا (الاختلاف) بالقيم، ما هو الاختلاف الأساسي بين القوتين؟.

عند تعاملك مع قانون كولون، يجب أن تتذكر بأنّ القوة هي مقدار متجه، وبالتالي يجب أنْ تكون معالجتك اعتماداً على ذلك. إنّ هذا القانون عندما يعبر عنه بشكل متجه من أجل القوة الكهربائية التي تمارسها شحنة $q_1$ على شحنة ثانية $q_2$، الذي يرمز له $\boldsymbol{F}_{12}$، يكون:

$$\boldsymbol{F}_{12} = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \hat{\boldsymbol{r}} \qquad \text{(23.6)}$$

الشكل المتجه لقانون كولون

حيث $\hat{\boldsymbol{r}}$ هو متجه الواحدة الموجّه من $q_1$ نحو $q_2$، كما هو مبين في الشكل (23.7) (a)، بما أن القوة الكهربائية (مثل قوة الثقالة) تخضع لقانون نيوتن الثالث (قانون الفعل ورد الفعل)، فإن القوة $\boldsymbol{F}_{21}$ التي تمارسها الشحنة $q_2$ على الشحنة $q_1$ تكون مساوية بالقيمة للقوة $\boldsymbol{F}_{12}$ التي تمارسها الشحنة $q_1$ على الشحنة $q_2$، لكن باتجاه معاكس؛ أي أن $\boldsymbol{F}_{12} = -\boldsymbol{F}_{21}$. أخيراً، من المعادلة (23.6) نرى أنّه إذا كان للشحنتين $q_1$ و $q_2$ نفس الإشارة، كما في الشكل (23.7)(a)، فإن إشارة الجداء $q_1q_2$ ستكون موجبة. وإذا كان للشحنتين $q_1$ و $q_2$ إشارتين متعاكستين، كما في الشكل (23.7)(b)، فإن إشارة الجداء $q_1q_2$ ستكون سالبة. إن هاتين الإشارتين (للجداء) تصفان الاتجاه النسبي *relative* direction لقوة الفعل ورد الفعل، وليس للاتجاه المطلق *absolute* direction.